Observations astronomiques depuis le sol avec une caméra infrarouge dans la gamme de longueurs d'onde 10 microns

S. Remy

Service d'Astrophysique, Centre d'Etudes de Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

Les observations astronomiques en infrarouge moyen sont essentielles et les résultats des observations réalisées avec le satellite infrarouge IRAS, lancé en 1983 par la NASA, et qui a fait pendant 18 mois une observation systématique du ciel, n'ont fait qu'élargir le champ d'investigation des recherches. En 1993 un satellite infrarouge européen construit par l'ESA, ISO, doit être lancé et un satellite américain, SIRTIF, est en projet. Malgré l'avantage d'éviter la gêne causée par l'atmosphère, les expériences spatiales coûtent cher et demandent une préparation minutieuse, aussi est-ce intéressant de savoir observer depuis le sol et de disposer d'instruments performants pour cela.

1- Intérêt astrophysique de l'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen, c'est à dire la gamme de longueurs d'onde autour de 10 μm , intéresse les astrophysiciens à plus d'un titre. Donnons quelques exemples de phénomènes, et d'objets au sein desquels ils apparaissent, observables à 10 μm .

1.1- Le continu thermique

D'après la loi de Kirchhof, 10 μm est la longueur d'onde correspondant au maximum de l'émission d'un corps noir dont la température est de l'ordre de 300 K. Cette température est en particulier celle d'objets astronomiques qualifiés de "froids" comme le sont souvent les poussières ou les petits grains de matières. C'est le cas des poussières présentes dans la chevelure, ou coma, d'une comète lorsque celle-ci passe au voisinage du soleil, comme le montre un spectre de la comète de Halley (fig 1.1) [1], ou bien des poussières dans lesquelles sont enfouis des objets "chauds", dont la température est autour de 2000 K. Le rayonnement propre de ces objets chauds est absorbé par le gaz

fig 1.2: Spectre de la nébuleuse planétaire du "Red Rectangle" autour de l'étoile HD 44179. Les cinq motifs constituant les "Bandes Non Identifiées" sont indiqués [4].

fig 1.1: Distribution de l'éclairement infrarouge entre 2.3 et 23 μm observé pour la comète de Halley le 13 mars 1986. Les données sont ajustées par un corps noir à 360 K. Les motifs à 9.7 et 19 μm sont dus à l'émission des silicates [1].

et les poussières qui les entourent, mais leur présence nous est révélée par le rayonnement thermique de ces poussières chauffées autour de 300 K /2/.

1.2- Spectres de raies ou de bandes

L'énergie d'un photon détectable à 10 μm est de l'ordre de 0.1 eV. Cette énergie correspond à des transitions entre des niveaux d'énergie assez voisins, comme c'est le cas pour les raies atomiques de structure fine, citons la raie à 10.68 μm de l'ion Ni^+ , produit de la nucléosynthèse, détectée dans les restes de supernovae /3/, ou encore pour les transitions de vibration-rotation au sein des molécules. Citons par exemple la série des "bandes non-identifiées", qui est un ensemble de cinq bandes moléculaires présentes dans de nombreux types d'objets astrophysiques comme les galaxies ou les nébuleuses planétaires (fig 1.2) /4/ et que l'on tente d'attribuer à des structures organiques d'une centaine d'atomes: les Poly Aromatic Hydrocarbons ou "PAH" /5/.

2- L'observation à 10 μm depuis le sol

L'étude de ces objets apparaît capitale pour mieux comprendre les phénomènes astrophysiques. Les observations à partir du sol offrent le grand avantage de leur faible coût comparé à celui des expériences embarquées sur satellite, mais la présence de l'atmosphère présente des inconvénients.

2.1- L'atmosphère

L'atmosphère est transparente entre 8 et 12 μm , il s'agit de la bande IRS III ou bande N /6/ et d'autre part, en infrarouge moyen, la turbulence atmosphérique n'est pas très gênante: à 10 μm le paramètre de Fried, r_0 , qui la caractérise est de l'ordre de 4 m /7/. L'observation depuis le sol des photons 10 μm en provenance d'objets astronomiques semble donc tout à fait aisée... mais cela est sans compter sur l'émission thermique de l'atmosphère elle-même, du moins au niveau de l'observatoire, et du télescope.

Ce rayonnement thermique de l'environnement, dont la température tourne autour de 273 K, introduit un bruit photonique qui limite fortement la détection de photons infrarouges en provenance de l'espace /9/. La luminance photonique spectrale au sol est de $10^6 \text{ Jy} \cdot \text{arcs}^{-2}$ ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), contre seulement $10^{-3} \text{ Jy} \cdot \text{arcs}^{-2}$ dans l'espace (essentiellement à cause de l'émission thermique de la poussière zodiacale) !

2.2- Sensibilité attendue d'un instrument basé au sol

Comparons la sensibilité attendue pour un instrument basé au sol à celles d'instruments embarqués sur satellites. La figure 2.1 résume les résultats /8/.

Au sol, pour un temps de pose d'une minute et un rapport signal sur bruit de trois, on atteint une sensibilité équivalente à celle obtenue pour le satellite IRAS, cela à cause du temps de pose très court, 0.19 s, imposé à ce satellite. En revanche, la sensibilité de la caméra infrarouge ISOCAM, qui est l'un des quatre instruments équipant le satellite européen ISO, est nettement meilleure (facteur 100 ?), essentiellement grâce à l'absence du bruit thermique introduit par l'environnement proche du télescope. Est-il alors nécessaire d'observer à partir du sol ?

2.3- Complémentarité Sol-Espace

Si les observations depuis l'espace ne sont pas gênées par l'atmosphère, les télescopes embarqués sur satellites ont des diamètres petits, 0.6 m pour ISO, comparés à ceux des observatoires actuels, 3.6 m au CFHT (Hawaii) ou à l'ESO (Chili), ou en cours de construction, 8 m pour le VLT (Chili). La conséquence immédiate de cela est le gain d'un ordre de grandeur en matière de résolution angulaire (fig 2.2) /8/.

Si l'espace offre la possibilité d'observer des objets dont l'émission est très faible, le sol permet en revanche d'avoir accès à davantage de détails morphologiques. D'où l'intérêt

de développer une caméra infrarouge pour faire de l'imagerie depuis le sol dans la gamme de longueurs d'onde 10 μm .

fig 3.1: Comparaison des sensibilités pour des sources ponctuelles de différents instruments, pour un temps de pose de une minute et un rapport signal sur bruit de trois.

fig 3.2: Comparaison des résolutions angulaires de différents instruments.

3- Présentation de la caméra CAMIRAS

CAMIRAS, CAMéra InfraRouge pour l'Astronomie au Sol, a été développée par le Service d'Astrophysique du Centre d'Etudes du CEA à Saclay, sous la direction de P.O. Lagage. La réalisation des détecteurs pour la voie "grande longueur d'onde" d'ISOCAM, la caméra devant équiper le satellite ISO, est à la base du développement par le LETI-LIR, de mosaïques de détecteurs destinées aux observations en infrarouge moyen.

3.1- Description

CAMIRAS est équipée d'une mosaïque de 64x64 détecteurs, ou pixels, en Si:Ga dont le domaine de réponse va de 3 à 18 μm . La figure 3.1 présente la coupe schématique de la mosaïque. Elle est placée dans un cryostat refroidi à l'hélium liquide autour de 4K. A cette température les CCD gèlent, aussi la lecture de chaque détecteur élémentaire se fait selon le système de "Lecture Directe en Tension", ou "Direct Voltage Readout"/10/. La particularité de cette caméra, comparée à d'autres instruments destinés aux observations en infrarouge moyen depuis le sol, est que ses détecteurs ont été équipés de grandes capacités de stockage de façon à permettre des observations dans toute la fenêtre atmosphérique sans saturer les détecteurs /10/.

Outre des filtres correspondant aux fenêtres atmosphériques à 3.5, 5, et 10 μm , CAMIRAS dispose également de filtres à bandes étroites pour des observations spécifiques et de deux "Filtres Circulaires Variables" (CVF) pour des observations autour de 3.5 μm et 10 μm avec une résolution spectrale de l'ordre de 50.

Les éléments de l'optique de CAMIRAS sont réalisés en germanium et les lentilles sont traitées anti-reflet. Le schéma optique de l'optique froide est décrit figure 3.2. Une première lentille L1 placée au foyer du télescope fait l'image de la pupille d'entrée, le

miroir primaire du télescope, sur un diaphragme froid. La lentille L2 refait l'image du plan focal du télescope sur le détecteur et définit l'angle de vue par pixel, 0.5" ou 0.7" au choix. Les différents filtres et les lentilles, définissant l'angle de vue par pixel, sont montés sur deux roues actionnées par des moteurs placés à l'extérieur de l'enceinte froide.

fig 3.1: Coupe schématique de la mosaïque de détecteurs. Les photoconducteurs sont hybridés par des billes d'indium aux circuits de lecture de type LDT /10/.

fig 3.3: Adaptateur optique définissant l'angle de vue θ d'un détecteur élémentaire.

3.2- Performances

Deux missions ont déjà été réalisées avec CAMIRAS au cours de la première partie de l'année 1991. La première a eu lieu en février au télescope des Pays Nordiques de l'Observatoire del Roque de los Muchachos, le NOT, dans l'archipel des Canaries, en collaboration avec l'Observatoire de Stockholm. La seconde mission s'est déroulée début mai au télescope franco-canadien de Hawaii, le CFHT, sur le site du Mauna Kea. La sensibilité de l'instrument pour une pose d'une minute et un rapport signal sur bruit de trois est de 200 mJy. Cette valeur est plus élevée que celle attendue dans le cas d'un instrument limité par le bruit de photons (BLIP), cependant CAMIRAS reste l'instrument le plus performant au monde dans sa catégorie /11/.

4- Techniques d'observation à 10 μ m depuis le sol

Nous avons vu que le handicap essentiel des observations depuis le sol à 10 μ m était la présence du fond thermique considérable. La luminance spectrale due au fond arrivant sur un pixel de la caméra CAMIRAS est de l'ordre de celle d'étoiles très brillantes à 10 μ m, comme le sont Arcturus ou Aldébaran. Or les sources astrophysiques que l'on va chercher à détecter peuvent être 10^{-4} voire 10^{-5} fois plus faibles que le fond. Tout se passe comme si l'observateur devait chercher à observer la flamme d'une bougie placée devant un projecteur puissant qui l'éblouirait !

4.1- Cas des monodétecteurs

Les utilisateurs de monodétecteurs ont mis au point une technique de modulation temporelle qui consiste à faire alternativement une image sur la source, au temps t , puis sur le fond voisin, au temps $t+\Delta t$. En retranchant les deux signaux ainsi obtenus, on élimine le fond:

$$(F+s)_t - F_{t+\Delta t} = s$$

C'est la technique de commutation de faisceau, connue sous le terme anglais de "chopping".

En fait, à cause des variations temporelles du fond dont on cherche à s'affranchir, le résultat de la soustraction précédente est:

$$(F+s)_t - F_{t+\Delta t} = s + (F_{t+\Delta t} - F_t) = s + \Delta F$$

La fréquence avec laquelle on effectue ces alternances doit être telle que la variation temporelle du fond, ΔF , n'introduise pas un bruit supplémentaire, appelé "bruit en

$1/f$, f étant une fréquence. Des études du ciel /11/ ont montré qu'il faut moduler rapidement, à une fréquence d'au moins 10 Hz.

4.2- Cas des mosaïques des détecteurs

4.2.1- Détecteurs idéaux

Dans le cas de l'utilisation de mosaïques de détecteurs le problème est différent car nous avons simultanément sur la mosaïque la source et le fond. Prenons le cas simple de deux pixels. Si le pixel 1 reçoit le signal source et le pixel 2 seulement le fond, alors en retranchant les deux signaux: $(F+s)_{t,1} - F_{t,2} = s$
C'est la technique de pose ou "staring" /10/.

4.2.2- Nécessité d'une correction de champ plat.

Malheureusement les détecteurs ne sont pas homogènes et ont des réponses différentes. En supposant la réponse linéaire, ce qui est le cas pour les détecteurs équipant la caméra CAMIRAS, c'est à dire que le signal détecté par le pixel i , S_i , est proportionnel au flux, alors:

$$S_1 - S_2 = G_1 s + G_1 F - G_2 F$$

Pour connaître la réponse individuelle de chaque détecteur on éclaire la mosaïque de façon homogène, à $10 \mu\text{m}$ un corps noir à la température ambiante convient: c'est un "champ plat" ou "flat field". Après correction G_1/G_2 et en retranchant toujours S_2 à S_1 :

$$S_1 - S_2 = G_1 s + G_1 F - G_2 \times G_1/G_2 \times F$$

4.2.3- Nécessité d'une modulation temporelle

Hélas, la correction de champ plat, G_1/G_2 , a une précision limitée, ϵ , de l'ordre de 1% /12/, si bien qu'en fait:

$$S_1 - S_2 = G_1 s + G_1 \epsilon F$$

Pour éliminer le terme $G_1 \epsilon F$ il faut moduler temporellement.

Au temps t , le pixel 1 voit la source et le pixel 2 le fond, au temps $t+\Delta t$, les deux pixels voient le fond. En retranchant après correction de champ plat S_2 à S_1 , puis cette différence obtenue au temps t à celle obtenue au temps $t+\Delta t$, il vient:

$$(S_1 - S_2)_t - (S_1 - S_2)_{t+\Delta t} = G_1 s + G_1 \epsilon \Delta F$$

Ce résultat diffère de celui obtenu pour un monodétecteur par le terme ϵ dans le second membre. Cela a pour conséquence que l'on peut diminuer considérablement, d'un facteur 100, la fréquence de modulation /10/. On peut moduler à 0.1 Hz simplement en pointant et dépointant le télescope.

4.2.4- Mise en pratique

Nous avons étudié, en observant un objet faible de 1 Jy, la galaxie Markarian 231, ponctuelle à $10 \mu\text{m}$, le rapport signal sur bruit pour différentes fréquences de modulation (fig 4.1). Contrairement à ce que laissait prévoir les considérations théoriques précédentes, nous constatons une fréquence optimale autour de 1 Hz.

Cette valeur résulte d'un compromis entre deux effets, conséquences de la "non perfection" des détecteurs. D'une part, les détecteurs présentent un bruit en " $1/f$ " qui apparaît pour des fréquences de modulations inférieures à 0.3 Hz, d'autre part, nous avons mis en évidence un effet du type rémanence à haute fréquence /9/.

Or l'inertie du miroir primaire est trop grande pour moduler autour du Hertz et un modulateur léger, comme ceux employés avec les monodétecteurs, reste nécessaire même si la fréquence de modulation est réduite par rapport à celle requise pour

l'observation avec des monodétecteurs. Les temps morts pendant les observations sont ainsi diminués, ce qui entraîne un gain non négligeable en temps utile d'observation.

4.3- Comparaison de deux méthodes de modulation.

Certains télescopes, comme le CFHT, sont équipés de miroirs secondaires vibrants permettant une modulation rapide (fig. 4.2). Or un tel dispositif coûte cher. Lors des observations au NOT nous avons utilisé un modulateur auxiliaire, mis au point par l'Observatoire de Stockholm, qui consiste en un petit miroir vibrant placé sur le faisceau. Ce dispositif permet en outre d'adapter la configuration optique en $f/11$ du NOT à l'optique de la caméra prévue pour la configuration en $f/36$ du CFHT (fig. 4.3). Le bruit introduit par ce modulateur auxiliaire augmente en fonction de l'amplitude spatiale de modulation et est plus important que le bruit dans le cas du miroir secondaire vibrant /9/ (fig 4.4).

fig 4.1: Etude du signal sur bruit d'une image en fonction de la fréquence de modulation /9/.

fig 4.2: Commutation de faisceau réalisée avec un miroir secondaire vibrant, du type CFHT.

fig 4.3: Commutation de faisceau réalisée avec un miroir vibrant auxiliaire, du type NOT. Ce dispositif permet également d'adapter la configuration optique $f/11$ du télescope NOT à la configuration $f/36$ de l'optique de la caméra.

Cependant si l'on couple la commutation de faisceau, modulation rapide, avec la permutation de champ, en bougeant le miroir primaire toutes les 10 ou 20 secondes, le bruit de l'image, même dans le cas du modulateur auxiliaire, s'en trouve considérablement réduit.

Or la permutation de champ, pratiquée par les utilisateurs de monodétecteurs, est indispensable dans le cas de sources très faibles car elle permet d'éliminer des résidus de fond dus à la différence d'émissivité des parties de l'optique balayées par le faisceau qui apparaissent lorsque l'on soustrait le signal "hors source" au signal "sur la source" (fig 4.5). De plus, le bruit de l'image obtenue avec permutation de champ couplée à la commutation de faisceau augmente comme la racine du nombre d'images intermédiaires sommées après chaque cycle du miroir primaire /9/. Nous ne sommes donc pas limités par la technique d'observation.

fig 4.5: Permutation de champ par basculement du miroir primaire du télescope.

fig 4.4: Etude de l'excès de bruit introduit par le modulateur auxiliaire utilisé au NOT en fonction de l'amplitude spatiale de modulation /8/. Le point "Hawaii" représente la donnée pour le modulateur du CFHT. Le point "avec nodding" représente la valeur obtenue au NOT avec permutation de champ /9/.

5- Premiers résultats d'observation

Disposant d'instruments performants et ayant mis au point la technique optimale pour observer au sol, il convient de présenter les premiers résultats obtenus avec des caméras sol comme CAMIRAS ou C10 μ qui est une caméra antérieure à CAMIRAS, équipée d'une mosaïque 32x32, développée conjointement par l'Observatoire de Lyon et le Service d'Astrophysique de Saclay /9/.

5.1- Observation de la comète Austin

La comète Austin a été observée avec la caméra C10 μ début mai 1990 au CFHT avec un filtre à bande large 8-13 μ m. La comète était alors à 0.34 Unité Astronomique (5 10⁷ km) de la Terre et 1.3 UA du Soleil. A cette distance, les poussières constituant sa chevelure sont chauffées à une température de l'ordre de 300 K et donc tout à fait observables en infrarouge moyen /15/.

Ces images, les premières d'une comète obtenues avec une caméra à mosaïque de détecteurs, fournissent une information sur la distribution de la poussière dans la coma interne, jusqu'à une distance du noyau de l'ordre de 4 10³ km; cela avec une résolution spatiale de 250 km correspondant à la résolution angulaire d'un pixel qui est 0.8".

Une première analyse de la morphologie de la comète indique une géométrie symétrique qui laisse supposer que la comète était dans un état calme lors de l'observation (fig 5.1) /16/. L'étude de la brillance de surface présente une distribution radiale compatible avec une loi en d^{-1} , d étant le diamètre du faisceau /15/. C'est ce à quoi on s'attend dans le cadre d'un modèle simple, pour lequel les grains ont une température constante, une distribution de taille radiale, et s'éloignent du noyau de façon isotrope et stationnaire, avec une vitesse constante. Cependant, au delà de 24" (on observe en effet jusqu'à 38" la coma à cause de la modulation) les données semblent montrer une déviation à cette loi et paraissent mieux modélisées par une loi en d^{-2} (fig 5.2) /16/. Un phénomène comparable a déjà été observé pour la comète Giacobini-Zinner /17/. Cet écart à la loi en d^{-1} peut s'expliquer par une variabilité dans le mécanisme d'éjection des grains /17/ ou encore leur sublimation.

fig 5.1: Courbe de contours de la Comète Austin observée au CFHT le 5 mai 1990 avec la caméra C10μ. Le maximum correspond à 1.5 Jansky dans 0.8", observé avec un rapport signal sur bruit de 43. Le dernier contour est au niveau du bruit [14].

fig 5.2: Rapport de la brillance de surface de la comète Austin avec la brillance de surface de comètes modélisées l'une avec une loi en d^{-1} , qui montre une déviation à 3σ l'autre avec une loi mixte en d^{-1} et d^{-2} à partir de 24", qui rend mieux compte des observations [14].

5.2- Une galaxie ultralumineuse: Markarian 231

Les galaxies ultralumineuses sont des galaxies très intenses, à des distances de l'ordre du milliard d'années lumière, révélées par le satellite infrarouge IRAS en 1983. L'énergie qu'elles rayonnent est gigantesque, au moins 10^{12} fois celle du Soleil, et se répartit essentiellement en infrarouge. En infrarouge moyen on observe le rayonnement de la poussière contenue dans ces galaxies qui, observée dans le visible, présente des formes étranges comme des "antennes" /18/. La source de chauffage de cette poussière reste mal définie: des zones de formation d'étoiles ? Un trou noir ?

La galaxie Mkr 231, observée avec C10μ en mai 1990 au CFHT, apparaît ponctuelle à 10 μm et cela risque de contraindre les hypothèses précédentes /19/.

5.3- Recherche de disque de poussières autour d'étoiles "normales"

Le Soleil est le prototype des étoiles "normales", dites "de la séquence principale", qui sont le siège de réactions thermonucléaires et qui rayonnent la quasi-totalité de leur énergie dans le domaine visible. Or le Soleil est accompagné d'un système planétaire constitué de planètes et de satellites et à plus grande échelle de poussières. La recherche d'autres systèmes de ce type suscite beaucoup d'intérêt.

En Mai 1991, nous avons observé au CFHT avec CAMIRAS une étoile candidat pour la présence d'un disque de poussières: 51 Oph. La comparaison avec une étoile ponctuelle comme Betelgeuse n'a pas mis en évidence d'étendue de l'émission de 51 Oph à 10 μm.

Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y a pas de disque, mais permet de définir les limites d'observation de tels objets et de contraindre les modèles /9/.

Une demande de temps sur le télescope de 3.6 m de l'Observatoire Sud Européen (ESO) au Chili a été faite pour le début de 1992 afin de mieux étudier le disque de poussières découvert par IRAS autour de l'étoile β Pictoris et de rechercher ainsi d'éventuels indices pour l'existence de systèmes planétaires extra-solaires /9/.

6- Perspectives des caméras sol 10 μ m

Si les observations de la comète Austin ont pu mener à une étude complète, les autres sujets abordés requièrent davantage d'observations et des demandes de temps de télescope concernant d'autres thèmes de recherche astrophysiques, comme la formation d'étoiles et la planétologie, ont été déposées. D'autre part, la préparation du programme scientifique d'ISO requiert des observations préparatoires et complémentaires à réaliser depuis le sol.

L'équipe de CAMIRAS, sous la direction de P.O. Lagage, a déjà accès à deux télescopes: le CFHT, à Hawaii, et le NOT, aux Canaries et la caméra C10 μ va peut-être équiper le télescope de 2 m de l'Observatoire du Pic du Midi. Une mission avec CAMIRAS a en outre été proposée pour le télescope de 3.6 m de l'ESO, nous donnant ainsi accès au ciel austral. Cela en attendant la livraison, par le Service d'Astrophysique de Saclay, pour ce même télescope, d'une troisième caméra sol 10 μ m française: TIMMI, prévue pour le courant de l'année 1992.

La plus part des résultats présentés ici sont extraits de ma thèse, dirigée par P.O. Lagage, et ce travail n'aurait pu aboutir sans les membres de l'équipe infrarouge sol du Service d'Astrophysique: René Jouan, Pierre Masse, et André Tarrius.

Références

- /1/ Hayward T.L. et al, Nature, 326, 55 (1987)
- /2/ Forrest et al, Astrophysical Journal, 219, 114 (1978)
- /3/ Meikle W. P. S., 22nd Eslab Symposium "Infrared spectroscopy in astronomy" édité par B. H. Kaldeich, p 329 (1988)
- /4/ Russel et al, Astrophysical Journal Letters, 220, 568 (1978)
- /5/ Leger et al, Astronomy and Astrophysics Letters, 137,L5
- /6/ Meysonette J. P., ce cours
- /7/ Madec J. P., ce cours
- /8/ Lagage P.O., communication personnelle
- /9/ Remy S., thèse présentée à l'université de Paris VII (1991)
- /10/ Lagage P.O. et al, SPIE vol 1130, 166 (1989)
- /11/ Gezari D. et al, IRTF news, 1990
- /12/ Remy S. et P.O. Lagage, Conférence "Dusty objects in the Universe", édité par Bussoletti E. et Vittone A.A., Kluwer Academic Publishers, p 267 (1990)
- /13/ Papoular R. et al, Astronomy and Astrophysics, 117, 46 (1983)
- /14/ Lecante C., mémoire d'ingénieur CNAM, 1990
- /15/ Eaton N., Vistas Astron., 27, 111 (1984)
- /16/ Lagage P.O. et Remy S., Astronomy and Astrophysics, soumis (1991)
- /17/ Jewitt et al, Astrophysical Journal, 317, 992 (1987)
- /18/ Mirabel I. F., La Recherche, 21, 1100 (1990)
- /19/ Mirabel, communication personnelle